5 . CARACTERÍSTICAS GERAIS DO CONTROLE SEMAFÓRICO

Neste capítulo são apresentados os principais elementos relacionados à implantação da sinalização semafórica, dado que essa implantação foi justificada com base nos critérios definidos no Capítulo 4 deste Manual. O presente capítulo aborda os elementos básicos que caracterizam a concepção do controle semafórico, e apresenta as diferentes estratégias, tipos de controle e os modos de implementação do controle semafórico. Na seção final do capítulo é feita uma análise geral dos diferentes tipos de controle e operação apresentados.

5.1 Elementos básicos

Na definição do controle semafórico são empregados os termos apresentados a seguir.

a) Grupo de movimentos

É o conjunto de movimentos presentes em uma mesma aproximação que recebem simultaneamente o direito de passagem (ver Figura 5.1).

b) Grupo semafórico

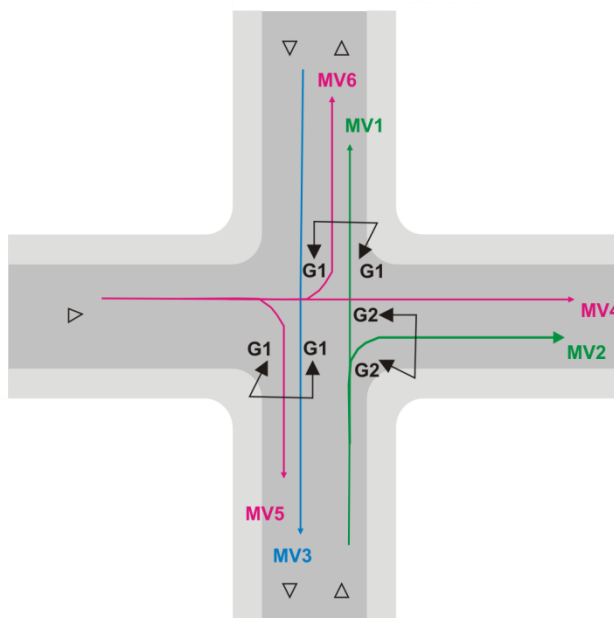
É o conjunto de semáforos (grupos focais) com indicações luminosas idênticas que controlam grupos de movimentos que recebem simultaneamente o direito de passagem (ver Figura 5.1)

Grupo de Movimentos 1: conjunto formado pelos movimentos MV1 e MV2
Grupo de Movimentos 2: conjunto formado pelo movimento MV3
Grupo de Movimentos 3: conjunto formado pelos movimentos MV4, MV5 e MV6
Grupo semafórico 1 (G1): conjunto de semáforos que controla os grupos de movimentos 1 e 2
Grupo semafórico 2 (G2): conjunto de semáforos que controla o grupo de movimentos 3

Figura 5.1: Ilustração do conceito de grupo de movimentos e grupo semafórico

c) Estágio

Denomina-se estágio o intervalo de tempo em que um ou mais grupos de movimentos recebem simultaneamente o direito de passagem. O estágio compreende o tempo de verde e o tempo de entreverdes que o segue.

d) Entreverdes

É o intervalo de tempo compreendido entre o final do verde de um estágio e o início do verde do estágio subsequente.

Para semáforos veiculares, o entreverdes é composto de um tempo de amarelo, acrescido de um tempo de vermelho geral sempre que necessário.

Para semáforos de pedestres, o entreverdes corresponde ao tempo de vermelho intermitente seguido, em casos específicos, do tempo de vermelho geral.

e) Vermelho geral

É o intervalo de tempo entre o final do amarelo (ou do vermelho intermitente) de um estágio e o início do verde do próximo estágio.

f) Ciclo

Denomina-se ciclo a sequência completa dos estágios de uma sinalização semafórica. A duração do ciclo em uma interseção, ou seção de via, é definida pela somados tempos de todos os estágios programados para o controle do tráfego no local.

g) Intervalo luminoso

É o período de tempo em que permanece inalterada a configuração luminosa dos semáforos (grupos focais) que controlam o tráfego em um determinado local.

h) Plano semafórico

Denomina-se plano semafórico ao conjunto de elementos que caracteriza a programação da sinalização semafórica (ver Capítulo 6 do Manual) para uma interseção ou seção de via, num determinado período do dia. O diagrama de estágios e o de intervalos luminosos são partes integrantes do plano semafórico.

i) Diagrama de estágios

O diagrama de estágios é a representação gráfica da alocação dos movimentos que podem ser realizados (motorizados e não motorizados) em cada estágio do ciclo. O movimento de pedestres e/ou ciclistas só **deve** ser representado no diagrama de estágios quando for sinalizado por grupos focais específicos. A Figura 5.2 mostra um exemplo de diagrama de estágios para o controle dos movimentos apresentados na Figura 5.1.

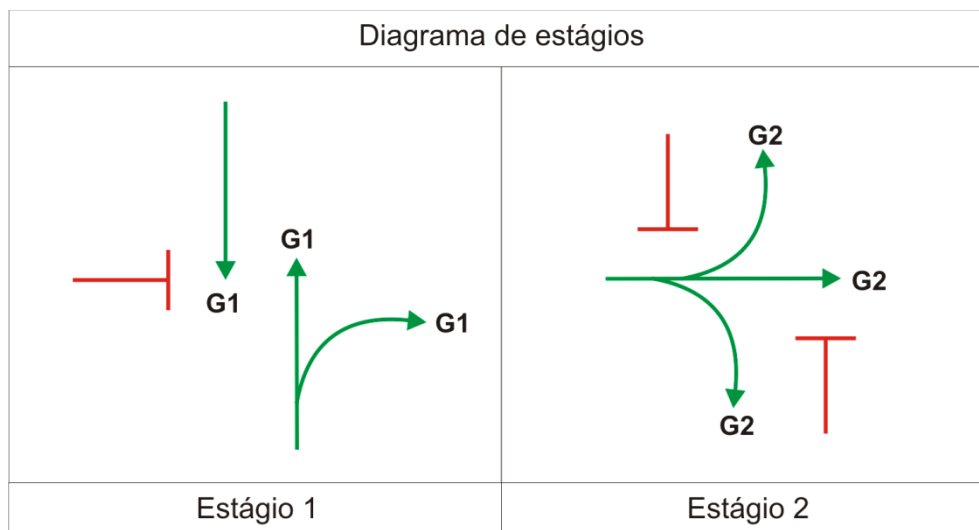



Figura 5.2: Exemplo de diagrama de estágios

j) Diagrama de intervalos luminosos ou diagrama de barras

Consiste na representação da duração e sequência dos intervalos luminosos e estágios por meio de barras horizontais, associando-os aos grupos semafóricos correspondentes. A Figura 5.3 apresenta um exemplo de diagrama de barras para o diagrama de estágios mostrado na Figura 5.2.

DIAGRAMA DE INTERVALOS LUMINOSOS

INSTANTE (s)	0	30	34	36	74	78 (80)
G1						
G2						
INTERVALOS	1	2	3	4	5	6
DURAÇÃO (s)	30	4	2	38	4	2
% CICLO	38	5	2	48	5	2
ESTÁGIOS	1			2		

Figura 5.3: Exemplo de diagrama de intervalos luminosos

5.2 Controle e operação

O controle do tráfego em uma interseção ou seção de via por meio da sinalização semafórica pode ser realizado de acordo com diferentes tipos e estratégias e ser implementado por diferentes modos. Nesta seção as principais alternativas são apresentadas.

5.2.1 Tipos de controle

Basicamente, são dois os tipos de controle proporcionados pela sinalização semafórica. O primeiro é o controle em tempo fixo e o segundo o controle atuado pelo tráfego, que possuem níveis distintos de resposta a variações observadas nos fluxos controlados.

a) Tempo fixo

O controle em tempo fixo utiliza planos semafóricos calculados com base em dados de tráfego disponíveis, obtidos por contagens volumétricas e outros levantamentos de campo. As contagens volumétricas, sempre que possível, **devem** ser classificatórias. O controle pode ser efetuado com base em um único plano semafórico, ou na adoção de planos específicos para atender a demanda de tráfego histórica de períodos distintos do dia e de diferentes dias da semana.

Ao longo do período de ação de um plano semafórico, o tempo de ciclo, a sequência de estágios e a duração dos intervalos luminosos são mantidos constantes. Os procedimentos para a determinação desses elementos são apresentados no Capítulo 7 do Manual.

b) Atuado

Os principais tipos de controle atuado pelo tráfego são: semi-atuado e totalmente atuado.

b.1) Semiatuado

O controle semi-atuado é, em geral, empregado em cruzamentos de vias de grande fluxo (vias principais) com vias de baixo fluxo de tráfego (vias secundárias).

Nesse tipo de controle a indicação verde é dada continuamente para os veículos da via principal, sendo interrompida quando detectores implantados nas aproximações da via secundária indicarem a presença de veículos motorizados.

Quando o controle semi-atuado for empregado em travessias de pedestres ou ciclistas, a interrupção da indicação verde para os veículos da via principal ocorre quando as botoeiras forem acionadas.

O momento de interrupção do verde da via principal, a partir da detecção na via secundária ou do acionamento da botoeira, e a duração do tempo de verde a ser atribuído à via secundária, são definidos com base em parâmetros de programação específicos, estabelecidos de acordo com os procedimentos indicados no Capítulo 8 deste Manual.

b.2) Totalmente atuado

O controle totalmente atuado decorre do monitoramento da demanda de tráfego na interseção, mediante a implantação de detectores de tráfego em todas as suas aproximações, permitindo alterações nos tempos dos estágios.

O princípio básico do funcionamento em modo totalmente atuado é o da determinação do tempo de verde associado a cada estágio de sinalização, variando entre um valor mínimo e um valor máximo pré-estabelecidos.

Esse tipo de controle pode permitir o ajuste em tempo real dos valores de alguns dos parâmetros de programação, como por exemplo, a prioridade a ser dada para uma aproximação congestionada.

Sua implantação requer a definição desses e de outros parâmetros de programação, apresentados no Capítulo 8 deste Manual.

5.2.2 Estratégias de controle

Ao definir o controle semafórico o projetista **deve** decidir entre duas estratégias básicas de controle: controle isolado ou controle em rede.

a) Controle isolado

No controle semafórico isolado, cada interseção é controlada independentemente das demais, ou seja, não ocorre nenhum tipo de coordenação semafórica. Nesse caso, a definição da programação semafórica leva em conta apenas a demanda (histórica ou atual) do tráfego em todas as aproximações.

Essa estratégia pode comprometer seriamente o desempenho da circulação do tráfego em situações onde as interseções controladas por sinalização semafórica estiverem muito próximas entre si. As situações em que o uso do controle isolado não é recomendado são apresentadas no Capítulo 9.

b) Controle em rede

O controle em rede pode visar o aumento do desempenho da circulação do tráfego ao longo de uma rede aberta ou de uma rede fechada. O controle em rede aberta visa privilegiar a circulação do tráfego em uma via (ou em um percurso pré-estabelecido) e, por isso, é comumente referido como controle em corredor. O controle em rede fechada, que visa melhorar o desempenho geral do tráfego em uma determinada região, é denominado controle em área.

A estratégia de controle em rede permite a programação da sinalização semafórica visando não somente o desempenho do tráfego em cada interseção mas, sobretudo, o seu desempenho global ao longo do conjunto de cruzamentos. Esse desempenho é avaliado com base em critérios definidos pelo órgão gestor do trânsito, em função do propósito do controle.

A programação da sinalização semafórica operando em rede implica, além da determinação dos parâmetros necessários para a programação isolada, a definição de um parâmetro adicional, denominado defasagem. Esse parâmetro estabelece, tomando como base uma referência temporal especificada, o momento de iniciar o verde de um estágio para cada interseção que integra a rede.

A definição da defasagem considera a chegada do tráfego nas aproximações na forma de pelotões. Tem-se, nesse caso, uma operação dita coordenada. Essa operação requer que a duração do ciclo seja a mesma para todas as interseções.

A determinação da defasagem é baseada no comportamento dos pelotões de veículos que circulam entre as interseções e, por isso, é relativamente complexa. A defasagem pode ser calculada manualmente ou com o auxílio de ferramentas computacionais. Existem diferentes programas computacionais comerciais para esse fim, tanto para o caso de operação em tempo fixo quanto de operação atuada pelo tráfego.

No caso do controle em rede aberta, procedimentos mais simples podem ser adotados, dentre os quais se destaca a utilização do diagrama espaço-tempo, apresentado no Capítulo 6 deste Manual.

As características do controle em rede são detalhadas no Capítulo 9 deste Manual.

5.2.3 Modos de operação

a) Controle local (descentralizado)

A programação semafórica é implementada diretamente no controlador, em campo. Qualquer alteração desejada na programação é feita usando os recursos disponíveis no controlador para a entrada manual de dados.

b) Controle centralizado

Nesse modo de operação, os controladores de tráfego são ligados a um computador central que gerencia a operação conjunta dos equipamentos.

O controle centralizado é utilizado para agilizar a operação do sistema de interseções semaforizadas, admitindo vários níveis de funcionamento.

No nível básico, são executadas as seguintes funções:

- ✓ monitoração do estado de funcionamento dos controladores e semáforos (grupos focais);
- ✓ implementação remota de alguns elementos da programação dos planos semafóricos.

Em outros níveis, quando da disponibilidade de sistemas de detecção de veículos, outras funções podem ser incorporadas, tais como:

- ✓ coleta de dados do tráfego;
- ✓ monitoração das condições de circulação;
- ✓ seleção e implementação de planos semafóricos em função da demanda;
- ✓ geração e implementação de planos semafóricos em função da demanda.

Quando da implantação do controle centralizado, as seguintes características **devem** ser, também, consideradas:

- ✓ o controle depende da confiabilidade do computador central e, por isso, são utilizadas algumas técnicas para evitar que problemas com o computador central comprometam as ações de controle;

- ✓ o controle centralizado requer uma rede de comunicação de alta confiabilidade e, portanto, de uma manutenção eficiente e eficaz;
- ✓ o controle centralizado requer a adoção de um protocolo de comunicação que facilite a sua futura expansão (recomenda-se a adoção de protocolo aberto);
- ✓ a operação do controle centralizado requer a atuação de equipe técnica especificamente treinada para esse fim;
- ✓ custo de implantação, operação e manutenção superior ao do modo local (descentralizado).

Devido às características do controle centralizado, recomenda-se que a decisão para sua adoção seja justificada por um estudo de viabilidade técnica, econômica e financeira.

5.3 Recursos computacionais para programação semafórica

Para operação de sistemas centralizados em tempo fixo e atuados, encontram-se disponíveis no mercado diversos programas.

O órgão gestor **deve** utilizar o programa que melhor atender suas necessidades de controle e sua disponibilidade de dados, de pessoal técnico e de equipamentos.

5.4 Análise comparativa das diferentes formas de controle

As principais vantagens e desvantagens dos controles em tempo fixo e atuado são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Vantagens e desvantagens do controle em tempo fixo e atuado

TIPO DE CONTROLE	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Tempo fixo	✓ A elaboração da programação e sua implantação em campo são simples no caso da operação isolada e em redes pequenas. ✓ Custo de implantação e operação inferior ao do controle atuado. ✓ Quando bem programado, levando em conta a variação do tráfego ao longo do dia, tem desempenho satisfatório.	✓ Planos semafóricos elaborados com dados de volume que não refletem a real situação do tráfego podem gerar excessivo atraso para veículos e pedestres. ✓ Requer coleta periódica de dados de tráfego para assegurar a qualidade dos planos semafóricos, que implica em custos elevados. ✓ A determinação dos planos para a operação coordenada exige conhecimentos específicos. ✓ Pouco eficiente para o controle em locais, ou períodos do dia, em que o volume de tráfego sofre muitas variações.
Atuado	✓ Desempenho favorável no controle do tráfego em situações de fluxo muito variável. ✓ Minimiza tempos de verde ociosos. ✓ É o mais indicado para o controle de travessias de pedestres em meio de quadra, quando a sinalização semafórica for justificada. ✓ O controle atuado permite a omissão de estágios. Na situação de múltiplos estágios, o aspecto de segurança **deve** ser cuidadosamente observado.	✓ O custo de implantação e manutenção do sistema atuado é mais elevado do que o de tempo fixo. ✓ Nem todos os controladores podem operar em modo totalmente atuado. ✓ A instalação dos detectores é dispendiosa e requer inspeção e manutenção periódicas para sua adequada operação. ✓ A definição dos parâmetros para a operação dos controladores atuados, especialmente no controle totalmente atuado, requer pessoal técnico especificamente capacitado para esse fim.

Com relação à comparação entre o modo de controle local (descentralizado) e centralizado, levando em conta as estratégias de controle (isolado e em rede) além dos aspectos referidos nas seções 5.2.2 e 5.2.3, cabe destacar:

- ✓ o modo de controle centralizado facilita a gestão semafórica, pois permite modificações rápidas na programação da sinalização semafórica, reduzindo os transtornos ocasionados pelas diversas ocorrências que obstruem o sistema viário, como colisões, veículos em pane, obras, desvios de tráfego etc.;
- ✓ o controle centralizado permite também que a programação semafórica seja aperfeiçoada sistematicamente, pois é mais conveniente planejar e aplicar as alterações pela central do que em campo;
- ✓ em modo centralizado são eliminados ou minimizados os problemas de erro no relógio do controlador;
- ✓ no modo centralizado, a rápida identificação de falhas no funcionamento dos equipamentos permite um atendimento mais eficiente das equipes de manutenção;
- ✓ o modo local tem custo de implantação e, geralmente, de manutenção inferior ao do modo centralizado.

6 . ELEMENTOS DA PROGRAMAÇÃO SEMAFÓRICA

O presente capítulo aborda os principais elementos envolvidos na programação semafórica.

Para cada elemento considerado, é apresentado o conceito, a forma de determinação e exemplos de aplicação, quando for pertinente. A definição de alguns elementos já foi apresentada no Capítulo 5, mas será repetida neste capítulo a fim de facilitar as explicações.

Questões relacionadas à programação de semáforos para ciclistas serão tratadas em manual específico.

6.1 Volume de Tráfego

Denomina-se volume de tráfego ao número de veículos ou pedestres que passa por uma dada seção de via durante o período de realização de uma contagem. No caso da programação semafórica, o volume de tráfego veicular é sempre determinado por sentido de circulação do tráfego, e é geralmente formado por diferentes tipos de veículos.

O volume de tráfego de cada movimento varia ao longo do tempo, sendo função da hora do dia, do dia da semana, da semana do mês, do mês e do ano em que esse movimento é observado. A variação temporal do volume de tráfego depende das características da cidade e do local específico.

Para efeito da programação semafórica, é importante analisar essa variação temporal do volume de tráfego, especialmente ao longo do dia e do dia da semana. Portanto, recomenda-se que as contagens sejam feitas, pelo menos, ao longo de um dia útil típico. A partir dessa análise é possível determinar, no caso da programação em tempo fixo, o número de planos semafóricos a serem calculados e o período do dia e dia da semana em que cada plano será implementado.

As Figuras 6.1 a 6.3 ilustram a variação do volume de tráfego de veículos pesquisado em uma via urbana, permitindo identificar os períodos de maior volume para cada unidade de tempo considerada.

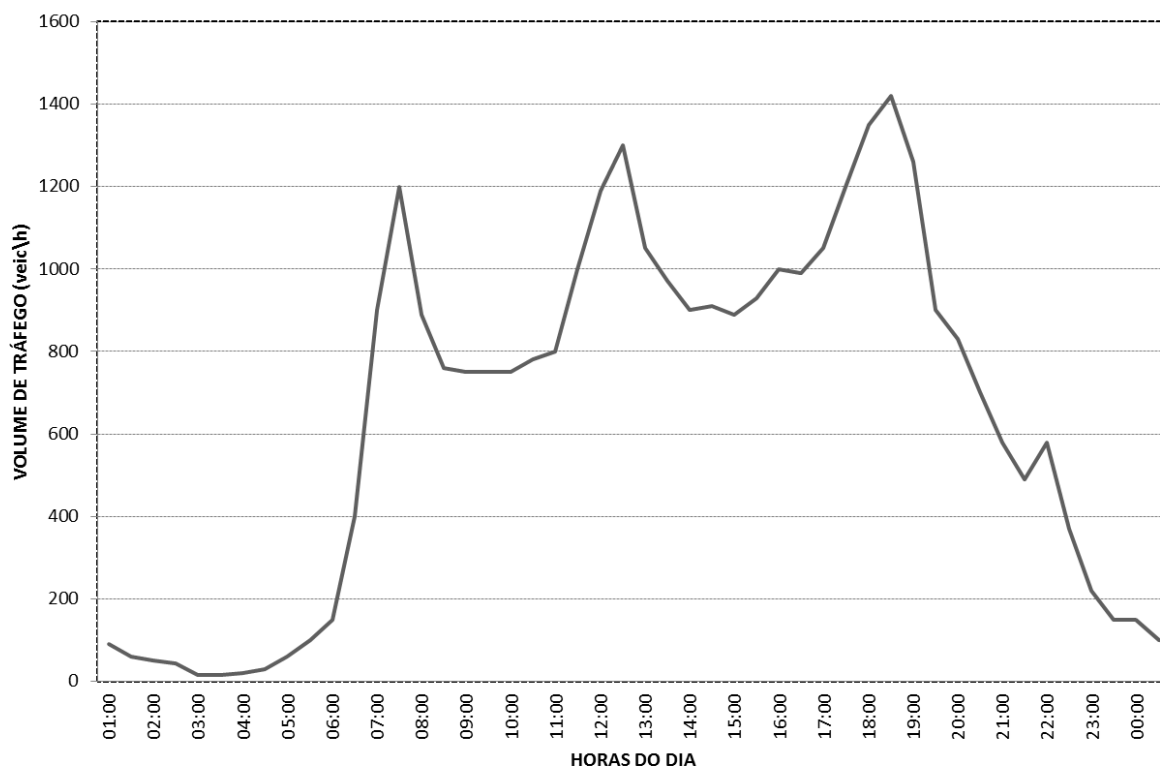



Figura 6.1: Exemplo da variação horária do volume em um dia útil

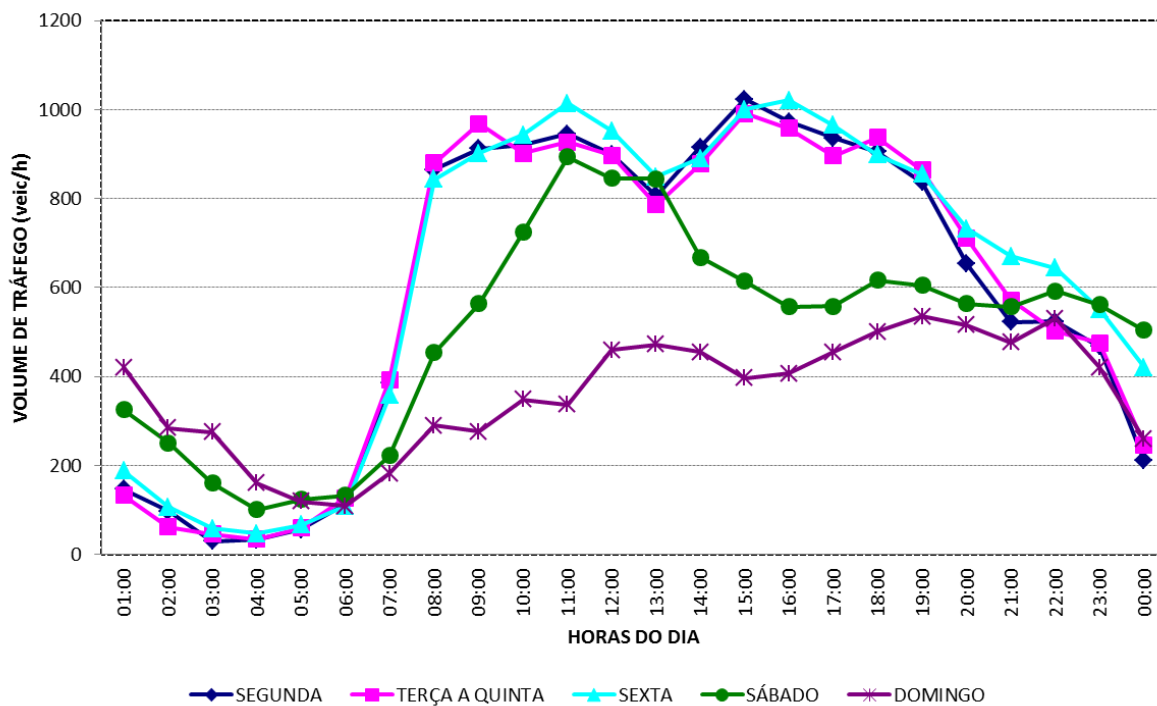



Figura 6.2: Exemplo da variação diária do volume ao longo da semana

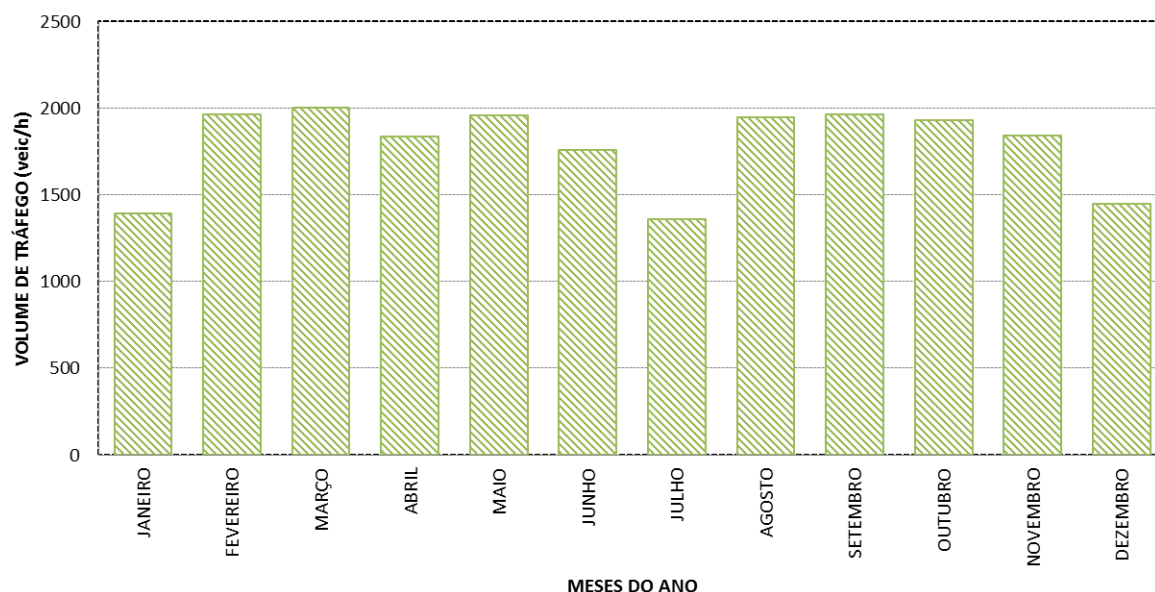



Figura 6.3: Exemplo da variação mensal do volume ao longo do ano

As contagens são usualmente registradas a cada 15 minutos e **devem** apresentar o número de pedestres e veículos de cada movimento.

No caso dos movimentos veiculares, a contagem **deve** ser classificada por tipo de veículo. Essa classificação se justifica pelo fato de veículos de tipos distintos apresentarem desempenho operacional diferenciado, que **deve** ser contemplado no cálculo da programação semafórica. Os tipos de veículos a serem considerados **devem** ser definidos na fase de planejamento dos trabalhos de coleta, em função das características do tráfego do local e do propósito da pesquisa. O Apêndice 3 traz um modelo de planilha utilizado para a contagem volumétrica classificada.

6.2 Volume de Tráfego Equivalente

Denomina-se volume de tráfego equivalente o volume de tráfego veicular expresso em termos de unidades de carros de passeio (ucp).

O desempenho de cada tipo de veículo difere em função de suas características. Os automóveis, referidos na literatura técnica como veículos leves, têm mais agilidade no trânsito se comparados aos veículos comerciais (ônibus, caminhões, carretas). Do mesmo modo, as motocicletas têm mais agilidade do que os automóveis.

Para se poder compor o volume de tráfego de uma via numa base única, utiliza-se o conceito de veículo equivalente. O veículo equivalente tem como valor de referência o automóvel, para o qual se adota fator de equivalência = 1,0 ucp (unidade de carro de passeio).

Para os demais tipos de veículos, o fator de equivalência de cada um reflete o desempenho de sua circulação no sistema viário em comparação com o desempenho do automóvel.

No caso particular da sinalização semafórica, o desempenho de um veículo está diretamente associado ao tempo de verde necessário para atendê-lo. Se, por exemplo, para passar por uma interseção semaforizada, certo tipo de veículo demorar o triplo do que demoraria um automóvel, então seu fator de equivalência é igual a 3.

Na Tabela 6.1 são apresentados os fatores de equivalência usualmente utilizados. A equivalência de veículos não previstos na tabela, tais como ônibus articulados, carretas e bicicletas, **deve** ser avaliada em estudos específicos.

Tabela 6.1: Fator de equivalência para diferentes tipos de veículos

TIPO	FATOR DE EQUIVALÊNCIA
Automóvel	1,00
Moto	0,33
Ônibus	2,00
Caminhão (2 eixos)	2,00
Caminhão (3 eixos)	3,00

Para efeito da programação semafórica, a Tabela 6.1 pode ser utilizada em situações onde não for possível medir o fluxo de saturação diretamente no local (Ver Apêndice 6).

6.3 Fluxo

Denomina-se fluxo de um movimento o número de veículos projetado para o período de uma hora a partir dos volumes medidos em uma dada seção de via, durante intervalos de tempo inferiores a uma hora.

Esse fluxo pode ser projetado a partir do Volume de Tráfego ou do Volume de Tráfego Equivalente.

Na programação em tempo fixo, o fluxo é projetado, usualmente, com base no volume máximo observado nos intervalos de 15min ao longo do período já estabelecido para a duração do plano. **Deve** ser considerado o intervalo de 15min em que a soma dos movimentos em todas as aproximações da interseção é máxima.

Para planos com duração superior a duas horas, os volumes **devem** ser observados, no mínimo, ao longo das duas horas mais carregadas.

Na literatura técnica, o termo Fluxo de Tráfego também é empregado como sinônimo de Volume de Tráfego, isto é, como o número de veículos ou pedestres que passa por uma dada seção de via durante o período de realização de uma contagem. Por isso, é importante que o técnico esteja atento para distinguir em qual dos dois sentidos que o termo fluxo está sendo empregado: se é o volume efetivamente observado num intervalo ou se é sua projeção para o período de uma hora.

6.4 Fluxo de Saturação e Tempo Perdido de um ciclo

6.4.1 Fluxo de saturação

O Fluxo de Saturação de um grupo de movimentos corresponde ao número máximo de veículos que poderia passar em uma aproximação controlada por sinalização semafórica no caso dessa aproximação receber indicação verde durante uma hora inteira. É representado pelo máximo fluxo de tráfego observado em períodos saturados, como ilustram as Figuras 6.4 e 6.5.

O Fluxo de Saturação é afetado pelas condições da via, do tráfego e do ambiente. Em relação às condições da via, os fatores mais importantes são a topografia, geometria, o número e a largura das faixas, e o estado do pavimento.

Quanto às condições do tráfego, o fluxo de saturação é influenciado pela composição do tráfego veicular (tipos de veículos), pelo volume de pedestres e por eventuais interferências tais como pontos de ônibus próximos.

6.4.2 Tempo perdido de um ciclo

No que diz respeito às características ambientais, a iluminação e a chuva são os fatores mais relevantes.

Para efeito da programação semafórica, Tempo Perdido de um ciclo, ou simplesmente Tempo Perdido Total, é a parte do ciclo que não é efetivamente utilizada pelos veículos. Sua ocorrência pode ter duas causas:

a) **Existência de estágio de pedestres.** Durante um estágio exclusivo para pedestres, a passagem dos veículos na interseção é interrompida.

b) **Alternância de passagem entre as correntes de tráfego veicular.** Em toda troca de estágio, por razões de segurança, ocorre um período de entreverdes durante o qual o fluxo dos veículos que estão perdendo o direito de passagem vai se reduzindo até chegar a zero. Além disso, demora certo tempo até que o fluxo dos veículos que estão ganhando o direito de passagem atinja o valor do fluxo de saturação. Durante estes dois intervalos, portanto, existe uma perda representada pela diferença entre o número de veículos que poderia ter passado, se o fluxo se mantivesse no patamar do fluxo de saturação, e o número de veículos que conseguiu efetivamente passar.

A Figura 6.4 mostra o que ocorre nesses dois intervalos e auxilia o entendimento da formulação matemática da questão. O segmento de reta AB está posicionado de forma que as áreas das duas figuras hachuradas no início do verde sejam iguais entre si.

Analogamente, o segmento de reta CD iguala as duas áreas hachuradas durante o entreverdes. Dessa forma, pode-se afirmar que a situação real equivale àquela em que o fluxo é nulo durante os intervalos tpi (tempo perdido no início do estágio) e tpf (tempo perdido no final do estágio) e igual ao fluxo de saturação durante o resto do estágio.

O tempo perdido total, representado por Tp, será calculado, então, com o uso da Equação 6.1.

$$T_p = t_{ep} + \sum_{i=1}^{n} (t_{pin_i} + t_{pfn_i}) \qquad (6.1)$$

em que,

T_p - tempo perdido total, em segundos;

t_{ep} – tempo de estágio exclusivo para pedestres, caso existente, em segundos;

n – número de estágios veiculares existentes;

t_{pin_i} – tempo perdido no início do estágio i, em segundos;

t_{pfn_i} – tempo perdido no final do estágio i, em segundos.

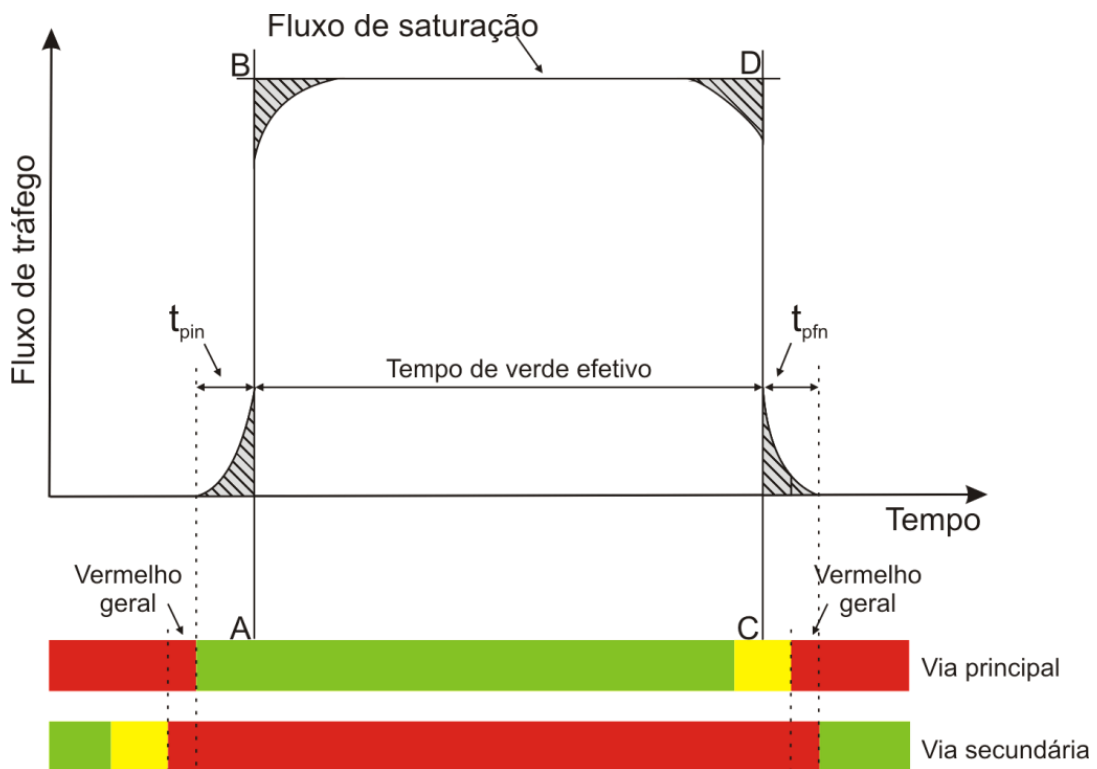



Figura 6.4: Fluxo de saturação e tempos perdidos em estágio saturado

A Figura 6.5 apresenta a condição mais comumente encontrada nas vias em que a passagem dos veículos à taxa de fluxo de saturação ocorre apenas durante um tempo inferior ao tempo de verde, até que a fila que se formou durante o vermelho seja dissipada. Após esse período verifica-se que o fluxo muda para um patamar inferior, que corresponde à demanda de veículos que continuam chegando à aproximação.

Nessa condição, ainda é possível medir diretamente no local o fluxo de saturação e o tempo perdido no início do estágio, mas não é mais possível medir o tempo perdido no final.

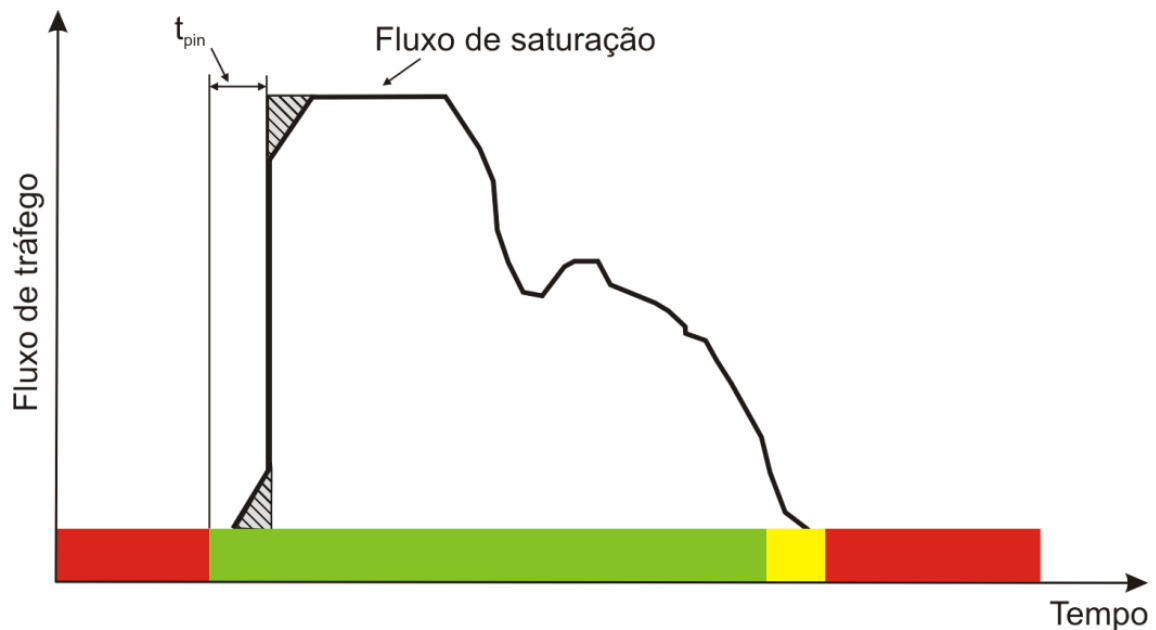



Figura 6.5: Fluxo de saturação e tempo perdido inicial em estágio não saturado

É recomendável medir diretamente no local os valores do fluxo de saturação e dos tempos perdidos inicial e final. O Apêndice 6 apresenta métodos para a medição desses parâmetros, além de procedimentos para estimá-los quando a medição não for possível.

6.5 Taxa de ocupação

Denomina-se taxa de ocupação de um grupo de movimentos, representada pelo símbolo *y*, a relação entre seu fluxo e o respectivo fluxo de saturação, expressos na mesma unidade. É calculada pela Equação 6.2.

$$y = \frac{F}{FS} \tag{6.2}$$

em que,

y – taxa de ocupação;

F – fluxo do grupo de movimentos, em veículos por hora, ou ucp por hora;

FS – fluxo de saturação do grupo de movimentos, em veículos por hora ou ucp por hora.

6.6 Grupo de Movimentos Crítico

Denomina-se grupo de movimentos crítico de um estágio o grupo de movimentos que apresenta maior taxa de ocupação dentre aqueles que recebem verde nesse estágio. O tempo de ciclo e os tempos de verde são calculados em função das taxas de ocupação somente dos grupos de movimentos críticos.

Quando um grupo de movimentos é servido em mais de um estágio, a determinação do tempo de ciclo e tempos de verde segue procedimento especial, apresentado no Exemplo 7.2.3 do Capítulo 7.

6.7 Período de entreverdes

Período de entreverdes é a parte do estágio programada após o fim do intervalo de verde, com o propósito de evitar acidentes entre os usuários que estão perdendo seu direito de passagem e aqueles que vão passar a adquiri-lo no estágio subsequente.

No caso dos grupos focais veiculares, compõe-se do intervalo de amarelo seguido, em alguns casos, do intervalo de vermelho geral. No caso de grupos focais de pedestres consiste no intervalo de vermelho intermitente seguido, em situações especiais, do intervalo de vermelho geral.

6.7.1 Período de entreverdes para os veículos

Este período tem a função de assegurar a travessia da interseção por veículos que, ao receberem a indicação amarela, se encontrem a uma distância da linha de retenção insuficiente para parar com segurança.

Neste caso, o tempo de entreverdes **deve** ser suficiente para que o veículo possa tanto percorrer a distância até a linha de retenção (d_1 na Figura 6.6) como concluir a travessia abandonando a área de conflito (d_2 na mesma figura) antes que os veículos ou pedestres dos movimentos conflitantes recebam direito de passagem.

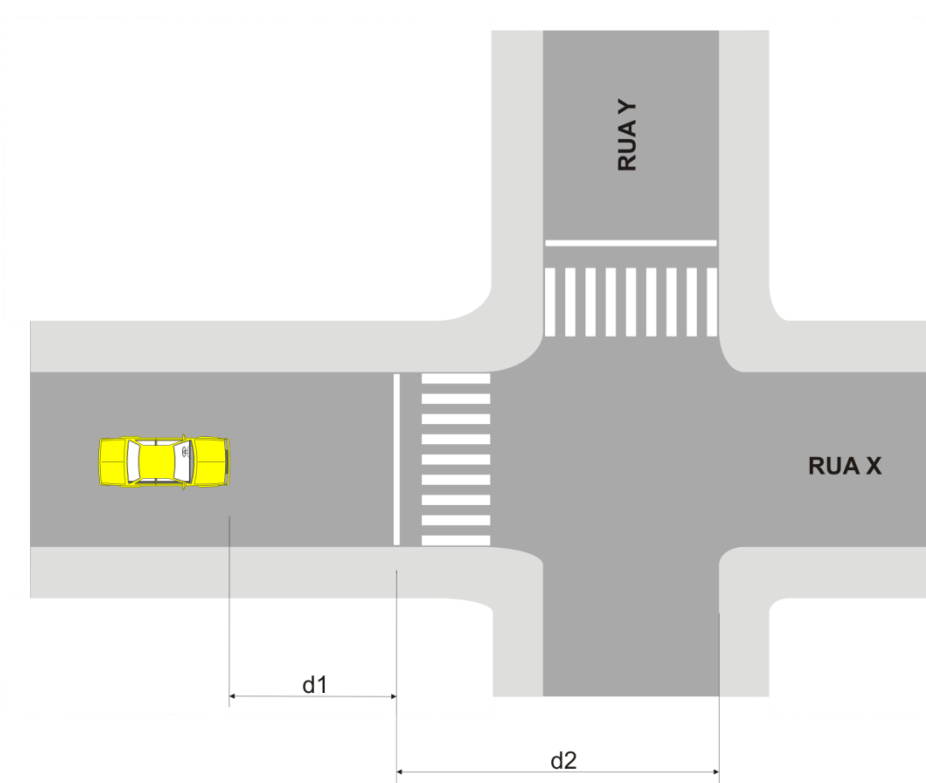



Figura 6.6: Distâncias percorridas pelo veículo junto à aproximação

A partir deste conceito a Equação 6.3 calcula o tempo de entreverdes necessário para atender o veículo que estiver na posição mais desfavorável no instante em que seu intervalo verde é encerrado.

$$t_{ent} = t_{pr} + \frac{v}{2(a_{ad} \pm ig)} + \frac{d_2 + c}{v} \quad (6.3)$$

em que,

t_{ent} – tempo do período de entreverdes para o grupo focal de veículos; em segundos;

t_{pr} - tempo de percepção e reação do condutor, em segundos;

v – velocidade do veículo, em m/s;

a_{ad} – máxima taxa de frenagem admissível em via plana, em m/s^2;

i – inclinação da via na aproximação, sendo "+" em rampas ascendentes e "-" em rampas descendentes (m/m);

g – aceleração da gravidade (9,8 m/s^2);

d_2 – extensão da trajetória do veículo entre a linha de retenção e o término da área de conflito, em metros;

c – comprimento do veículo, em metros.

Ao compor o período de entreverdes, o tempo de amarelo (t_{am}) **deve** ser igual à soma das duas primeiras parcelas da Equação 6.3 e o tempo de vermelho geral (t_{vg}) **deve** ser igual à última. Nesse caso, esses tempos serão calculados segundo as Equações 6.4 e 6.5.

$$t_{am} = t_{pr} + \frac{v}{2(a_{ad} \pm ig)} \quad (6.4)$$

e

$$t_{vg} = \frac{d_2 + c}{v} \quad (6.5)$$

em que t_{am} representa o tempo de amarelo enquanto t_{vg} indica o tempo de vermelho geral.

Usualmente, adotam-se os seguintes valores para as grandezas envolvidas:

t_{pr} = 1,0 s;

v= velocidade regulamentada da via, expressa em m/s;

a_{ad} = 3,0 m/s^2;

c = 5 m (onde o fluxo é predominantemente constituído por automóveis).

Em situações em que o local apresente condições particulares de topografia ou composição do tráfego, estes valores **devem** ser substituídos por outros levantados diretamente em campo.

A máxima taxa de frenagem admissível varia em função das características dos veículos e da via. Assim, o valor usual de 3,0 m/s^2 representa condições médias observadas na prática. Para situações especiais, o técnico **deve** realizar estudos para definir a taxa a ser usada no projeto.

Por razões de segurança, em vias com velocidade máxima regulamentada igual ou inferior a 40 km/h, o tempo de amarelo **não deve** ser inferior a 3s, independentemente do valor do vermelho geral.

Analogamente, em vias com velocidade máxima regulamentada igual a 50 ou 60 km/h, o tempo de amarelo **não deve** ser inferior a 4s. Para vias com velocidade regulamentada igual a 70 km/h, o tempo mínimo de amarelo **deve** ser igual a 5s.

Para todas as velocidades máximas regulamentadas, o tempo de amarelo não deve ser superior a 5s. Portanto, se o valor calculado pela equação 6.4 for superior a 5s, deve ser adotado t_{am} = 5s e o restante do entreverdes concedido na forma de vermelho geral.

No caso de controladores antigos, em que não seja possível adotar o vermelho geral, o tempo mínimo de amarelo **deve** corresponder ao tempo total de entreverdes, e **deve** ser calculado de acordo com a Equação 6.3. No entanto, se esse valor for superior a 5s, **deve** ser adotado t_{am} = 5s e o restante do entreverdes concedido na forma de vermelho geral, mesmo que isso implique na troca do controlador.

6.7.2 Período de entreverdes para os pedestres

O entreverdes para os pedestres é composto basicamente pelo intervalo de vermelho intermitente. **Deve** ser suficiente para que o pedestre que iniciou sua travessia no intervalo de verde possa concluí-la com segurança na velocidade normal de caminhada.

A Equação 6.6 calcula o tempo do intervalo de vermelho intermitente necessário para atender o pedestre que estiver na posição mais desfavorável no instante em que seu intervalo verde é encerrado.

$$t_{ent} = t_{pr} + \frac{l}{v_p} \qquad (6.6)$$

em que,

t_{ent} – tempo do intervalo de vermelho intermitente para o grupo focal de pedestres, em segundos;

t_{pr} - tempo de percepção e reação do pedestre, em segundos;

l – extensão da travessia, em metros;

v_p – velocidade do pedestre, em m/s.

Usualmente, adota-se o tempo de percepção e reação do pedestre igual a 1,0 s e a sua velocidade igual a 1,2 m/s.

Em situações específicas, em que o local é utilizado sistematicamente por pedestres com mobilidade reduzida ou quando, devido às características do local, são verificados

deslocamentos mais lentos, estes valores **devem** ser substituídos por outros levantados diretamente em campo.

6.8 Grau de Saturação

Grau de saturação de um grupo de movimentos, representado pelo símbolo *x*, é uma grandeza obtida pela relação entre o volume do grupo de movimentos e a capacidade para o atendimento desse volume no período de tempo considerado. Em geral, o grau de saturação é determinado para o período de uma hora.

A Figura 6.7 ilustra o conceito de grau de saturação observado durante um ciclo. Pode-se observar que a área hachurada, que representa o volume, é inferior à área do retângulo, que representa a capacidade. O grau de saturação é obtido pela relação entre essas áreas.

O grau de saturação é um indicador que reflete se existe reserva de capacidade para o atendimento do grupo de movimentos, ou se a aproximação correspondente está próxima da saturação.

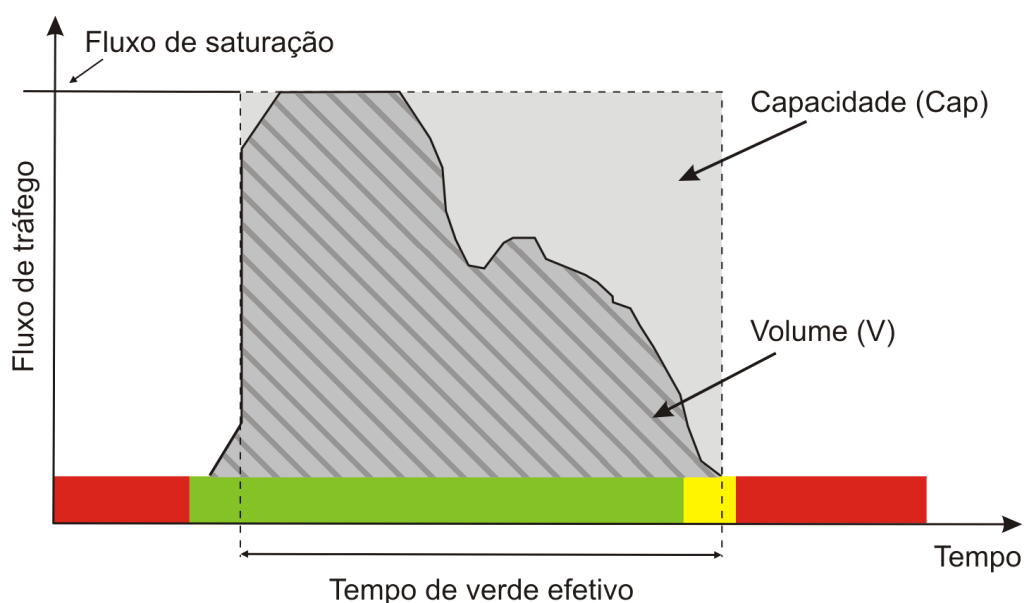



Figura 6.7: Ilustração dos conceitos de capacidade e grau de saturação

O grau de saturação de um grupo de movimentos é calculado pela expressão mostrada na Equação 6.7.

$$x = \frac{V}{Cap} \qquad (6.7)$$

em que,

x – grau de saturação;

V – volume do grupo de movimentos, em veículos por hora, ou ucp por hora;

Cap – capacidade, em veículos por hora, ou ucp por hora (ver item 6.11).

6.9 Ciclo

Denomina-se ciclo a sequência completa das indicações de um semáforo. O tempo necessário para que um ciclo inteiro seja cumprido em uma interseção, ou seção de via, é determinado pela somados tempos de todos os estágios programados para o controle do tráfego no local.

Como valores altos para o tempo de ciclo implicam em tempos de espera muito elevados, nas situações comuns de controle esse valor não **deve** superar 120s. Em situações excepcionais de tráfego e/ou de geometria da interseção, pode ser necessário adotar tempos de ciclo maiores. Nesses casos **deve** ser dada especial atenção ao tratamento para a travessia dos pedestres no local, adotando-se medidas como implantação de travessia em etapas, travessia em desnível, dentre outras soluções possíveis.

Apresenta-se a seguir dois métodos para calcular o tempo de ciclo: Método do grau de saturação máximo e Método de Webster.

6.9.1 Método do grau de saturação máximo

É baseado no grau de saturação máximo definido pelo projetista para cada grupo de movimentos no período dos 15 minutos de volume máximo, conforme indicado no item 6.3.

O método inicia pelo cálculo da fração de verde necessária para cada estágio, por meio da Equação 6.8.

$$p_i = \frac{y_i}{xm_i} \qquad (6.8)$$

em que,

p_i – fração de verde requerida para o estágio i;

y_i – taxa de ocupação do grupo de movimentos crítico do estágio i;

xm_i – grau de saturação máximo definido para o grupo de movimentos crítico do estágio i.

A partir do cálculo da fração de verde para cada estágio, o tempo de ciclo é calculado por meio da Equação 6.9.

$$t_c = \frac{T_p}{1 - \sum_{i=1}^{n} p_i} \qquad (6.9)$$

em que,

t_c – tempo de ciclo, em segundos;

T_p – tempo perdido total, em segundos;

p_i – fração de verde requerida para o estágio i;

n – número de estágios.

No caso particular em que se deseja adotar o mesmo grau de saturação xm para os grupos de movimentos críticos de todos os estágios, a determinação do tempo de ciclo é feita por meio da Equação 6.10, que é um caso particular da Equação 6.9.

$$t_c = \frac{xm\, T_p}{xm - \sum_{i=1}^{n} y_i} \qquad (6.10)$$

Usualmente, adotam-se valores de grau de saturação compreendidos entre 0,75 e 0,90.

Valores superiores a 0,90 podem conduzir a uma reserva de capacidade insuficiente para absorver tanto a flutuação aleatória do trânsito como a redução ocasional do fluxo de saturação devido à ocorrência de incidentes. Por outro lado, valores inferiores a 0,75 podem conduzir a tempos de ciclo injustificadamente elevados.

6.9.2 Método de Webster

Calcula o tempo de ciclo, denominado pelo autor de ciclo ótimo, de forma que o tempo de espera veicular seja mínimo. Este método pressupõe chegadas aleatórias dos veículos nas aproximações e, portanto, sua utilização não é recomendada quando essa condição não se verifica. Também no caso de interseções com alto grau de saturação, a utilização desse método não é recomendável.

O tempo de ciclo ótimo é calculado por meio da Equação 6.11.

$$t_{co} = \frac{1{,}5 \times T_p + 5}{1 - \sum_{i=1}^{n} y_i} \qquad (6.11)$$

em que,

t_{co} – tempo de ciclo ótimo, em segundos;

T_p – tempo perdido total, em segundos;

y_i – taxa de ocupação do grupo de movimentos crítico do estágio i;

n – número de estágios.

De acordo com Webster, tempos de ciclo na faixa de 0,75 a 1,5 do tempo de ciclo ótimo produzem atrasos médios por veículos no máximo 20 % superiores ao valor do atraso obtido com o ciclo ótimo.

6.10 Tempo de verde real e tempo de verde efetivo

Denomina-se tempo de verde real de um estágio a duração do período em que o respectivo grupo focal permanece em verde, durante um ciclo.

Denomina-se tempo de verde efetivo de um estágio ao tempo de verde de um ciclo que seria efetivamente utilizado pelo fluxo do grupo de movimentos crítico, se este fosse descarregado com valor igual ao fluxo de saturação. Esse conceito somente se aplica no caso de operação saturada (ver Figura 6.4).

O tempo de verde efetivo é calculado pela Equação 6.12, quando o ciclo for determinado pelo Método do grau de saturação máximo, ou pela Equação 6.13, no caso da utilização do Método de Webster.

$$t_{v,efet,i} = p_i \times t_c \quad (6.12)$$

em que,

$t_{v,ef,i}$ – tempo de verde efetivo do estágio *i*, em segundos;

t_c – tempo de ciclo, em segundos;

p_i – fração de verde requerida para o estágio *i*.

$$t_{v,efet,i} = \left(t_c - T_p\right) \times \frac{y_i}{\sum_{i=1}^{n} y_i} \quad (6.13)$$

em que,

$t_{v,ef,i}$ – tempo de verde efetivo do estágio *i*, em segundos;

t_c – tempo de ciclo, em segundos;

T_p – tempo perdido total, em segundos;

y_i – taxa de ocupação do grupo de movimentos crítico do estágio *i*;

n – número de estágios.

A Equação 6.14 relaciona o tempo de verde real ao tempo de verde efetivo.

$$t_{v,real} = t_{v,efet} - t_{ent} + t_{pin} + t_{pfn} \quad (6.14)$$

em que,

$t_{v,real}$ – tempo de verde real, em segundos;

$t_{v,efet}$– tempo de verde efetivo, em segundos;

t_{ent} – tempo de entreverdes, em segundos;

t_{pin}– tempo perdido no início, em segundos;

t_{pfn} – tempo perdido no final, em segundos.

No caso de estágio de pedestres, o tempo de verde efetivo é igual ao tempo de verde real. O valor mínimo do tempo de verde do estágio de pedestres **deve** ser igual a quatro segundos, sendo o valor recomendado igual a sete segundos. Características específicas da travessia ou

do fluxo de pedestres podem recomendar a adoção de valores superiores a sete segundos para o tempo de verde.

No caso em que a travessia de pedestres é servida durante um estágio veicular (travessia tipo carona), o tempo de verde do grupo focal do pedestre é determinado em função da duração desse estágio. O tempo de verde do grupo focal do pedestre será igual ao tempo do estágio veicular subtraído do tempo de vermelho intermitente (acrescido ou não de um tempo de vermelho geral) que deve ser igual ao tempo necessário para a travessia. Nesse caso, o tempo de verde para pedestres deve atender os valores mínimos estabelecidos no parágrafo anterior, podendo excedê-los.

Em todos os casos, o tempo de vermelho intermitente **deve** ser dimensionado de acordo com a Equação 6.6 (ver item 6.7.2), para garantir a travessia segura dos pedestres.

6.11 Capacidade

Denomina-se capacidade de um grupo de movimentos o número máximo de veículos que pode passar em uma aproximação controlada por sinalização semafórica durante uma hora, considerando-se a sua operação normal. É determinada pela Equação 6.15.

$$Cap = FS \times \frac{t_{v,efet}}{t_c} \qquad (6.15)$$

em que,

Cap – capacidade, em veículos por hora ou ucp/h;

FS – fluxo de saturação, em veículos por hora ou ucp/h;

$t_{v,efet}$ – tempo de verde efetivo, em segundos;

t_c – tempo de ciclo, em segundos.

O conceito de capacidade está representado na Figura 6.7.

6.12 Pelotões

A retenção dos veículos durante o intervalo vermelho faz com que se agrupem até serem liberados durante o verde. Quando liberados, eles iniciam a circulação em grupos compactos, denominados pelotões. À medida que o pelotão vai se afastando da linha de retenção, tende a se dispersar, processo denominado dispersão de pelotões. A Figura 6.8 ilustra esse processo ao longo de um segmento viário localizado a jusante de uma faixa de pedestres controlada por sinalização semafórica.

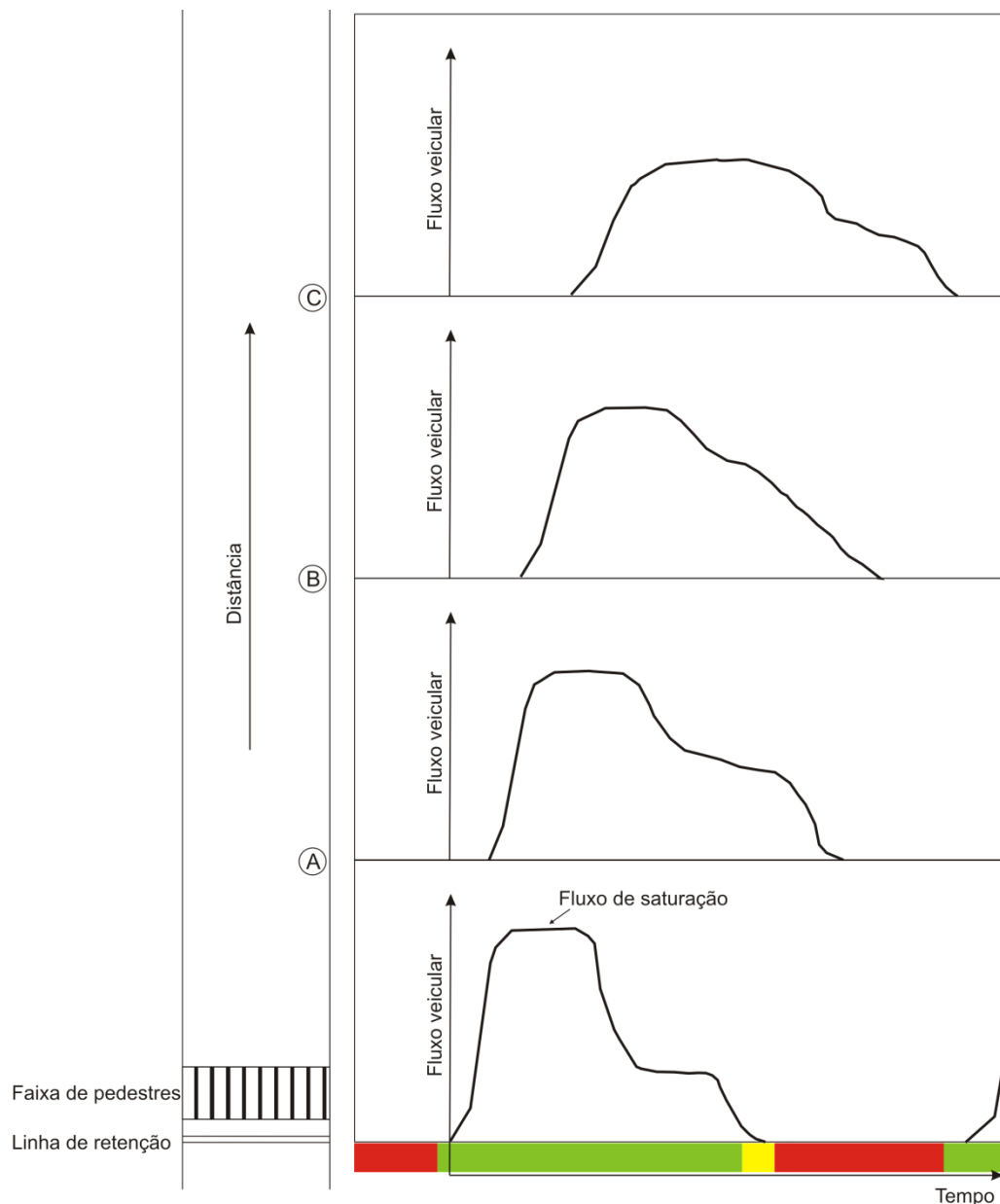



Figura 6.8: Dispersão de pelotões ao longo de um segmento viário

6.13 Defasagem

Considerando-se uma corrente de tráfego que passa por dois locais semaforizados pertencentes à mesma rede, denomina-se defasagem o intervalo de tempo decorrido entre o início do verde que essa corrente recebe nos dois locais.

Dois locais que pertencem à mesma rede **devem** operar no mesmo tempo de ciclo, ou na situação particular em que o tempo de ciclo de um local é submúltiplo do existente no outro.

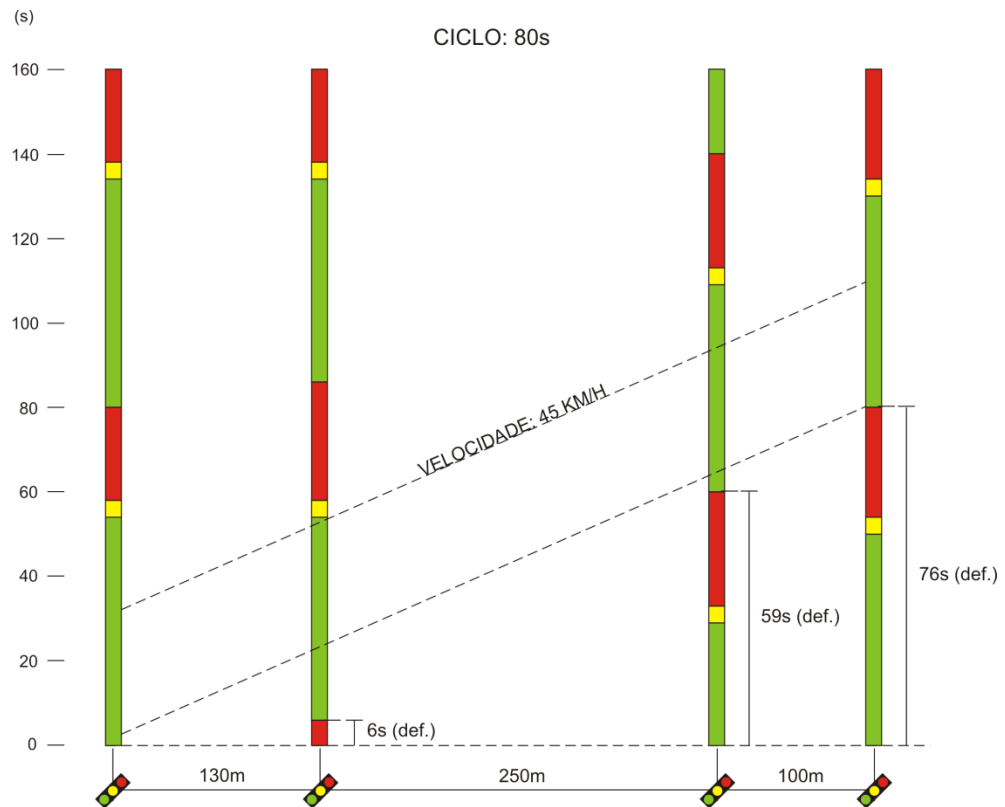
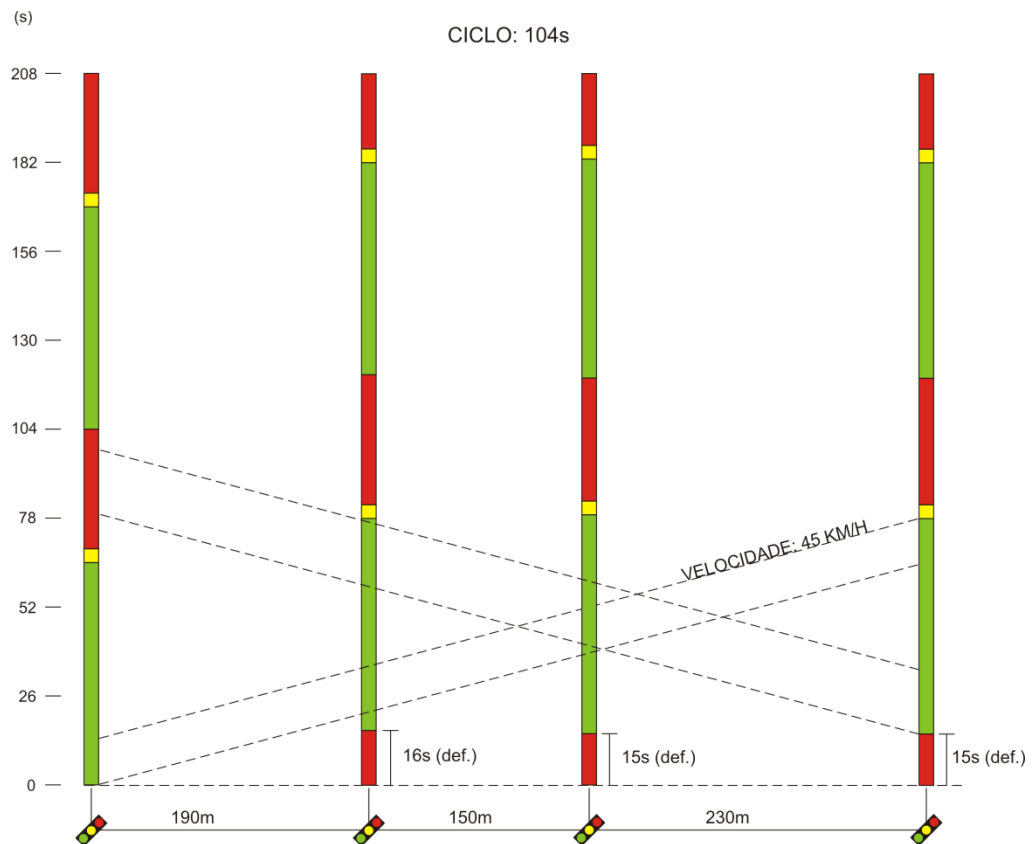
A Figura 6.9 apresenta diagramas espaço-tempo, que ilustram a defasagem entre sinalizações semafóricas ao longo de uma via arterial, tendo como referência o início do verde da interseção mais à esquerda.

(a) Via de mão única

(b) Via de mão dupla

Figura 6.9: Defasagem entre sinalizações semafóricas ao longo de uma via arterial

6.14 Tempo de verde de segurança

Tempos de verde excessivamente curtos não são admissíveis, mesmo que sejam suficientes para atender a respectiva demanda, pois conduzem a situações com alto potencial de acidentes. Para evitá-los, define-se para cada grupo de movimentos, um parâmetro denominado tempo de verde de segurança, que corresponde ao valor mínimo admissível para a duração do tempo de verde que atende a esse grupo.

O dimensionamento da duração desse elemento para veículos é função da hierarquia da via, do volume de veículos, da largura da transversal, da composição do tráfego e da presença de pedestres.

Especificamente com relação à presença de pedestres, o tempo de verde de segurança para os veículos **deve** ter a duração necessária para garantir a travessia dos pedestres, com ou sem grupo focal para pedestres, cujo deslocamento é paralelo ao movimento para o qual está se determinando o verde de segurança veicular.

Os valores utilizados para o tempo de verde de segurança para os veículos variam usualmente entre 10 e 20 segundos, não sendo admitidos valores inferiores a 10 segundos.

O dimensionamento do tempo de verde de segurança para pedestres é função do volume de pedestres e das características específicas de cada travessia. Recomenda-se que a duração desse verde de segurança seja igual ou superior a 4 (quatro) segundos. Deve-se ressaltar que o pedestre que iniciou a travessia durante o tempo de verde, tem a complementação dessa travessia garantida durante o intervalo de vermelho intermitente.

A maior parte dos controladores semafóricos fabricados atualmente permite a programação do tempo de verde de segurança associado a cada grupo de movimentos. Essa programação **deve** refletir os valores calculados para os tempos de verde de segurança na etapa de dimensionamento da sinalização semafórica.

6.14.1 Recálculo da programação

Quando o tempo de verde para certo grupo de movimentos resultar inferior ao correspondente verde de segurança, **deve-se** recalcular a programação a fim de permitir que essa condição passe a ser satisfeita.

Em primeiro lugar, impõe-se que o tempo de verde do grupo de movimentos para o qual ocorreu a insuficiência seja igual ao correspondente tempo de verde de segurança; isso é realizado ajustando o(s) tempo(s) de verde do(s) estágio(s) em que tal grupo de movimentos é liberado. O próximo passo consiste em recalcular o tempo de ciclo para, em seguida, redimensionar os tempos de verde dos estágios.

Apresentam-se, a seguir, os dois métodos mais utilizados para recalcular o tempo de ciclo em função da necessidade de impor, para o estágio j, um tempo de verde real igual ao seu tempo de verde de segurança.

O Método 1 conduz à condição de que todos os grupos de movimentos críticos possuam o mesmo grau de saturação. Entretanto, para garantir tal igualdade, o tempo de ciclo, usualmente, atinge valores muito elevados causando atrasos indesejáveis. Por isso, em geral, se utiliza o Método 2, onde o usuário adota os valores de grau de saturação desejados, exceto

para o estágio que teve seu tempo de verde fixado como igual ao tempo de verde de segurança.

No subitem 7.2.4 é apresentado um exemplo numérico de recálculo da programação, para o caso em que o verde calculado é inferior ao verde de segurança, levando em conta os dois métodos.

6.14.2 Método 1

A partir do cálculo do tempo de verde efetivo (Equação 6.13) e do tempo de verde real (Equação 6.14), chega-se à seguinte expressão para a obtenção do tempo de ciclo:

$$t_c = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{y_i}\right) \times \left(t_{v,real} + t_{ent} - t_{pin} - t_{pfn}\right) + T_p$$

Impondo nessa expressão a condição de que o tempo de verde do estágio j é igual ao seu tempo de verde de segurança ($t_{v,seg,j}$), chega-se à Equação 6.16.

$$t_c = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{y_j}\right) \times \left(t_{v,seg,j} + t_{ent,j} - t_{pin,j} - t_{pfn,j}\right) + T_p \qquad (6.16)$$

O cálculo dos tempos de verde é realizado utilizando a Equação 6.13.

6.14.3 Método 2

A Equação 6.9 pode ser escrita na forma:

$$\mathrm{t_c = t_c \times p_1 + t_c \times p_2 + \ldots + t_c \times p_i + \ldots + t_c \times p_n + T_p}$$

Consideremos que o estágio *j* tenha seu tempo de verde real igualado ao seu tempo de verde de segurança ($t_{v,seg,j}$). Aplicando essa condição à Equação 6.14, vem:

$$t_{v,efet,j} = t_{v,seg,j} + t_{ent,j} - t_{pin,j} - t_{pfn,j}$$

Combinando as duas equações anteriores e considerando a Equação 6.12, chega-se à seguinte expressão para a obtenção do tempo de ciclo:

$$t_c = t_c \times p_1 + \ldots + \left(t_{v,seg,j} + t_{ent,j} - t_{pin,j} - t_{pfn,j}\right) + \ldots + t_c \times p_n + T_p \qquad (6.17)$$

A fim de obter as frações de verde p_i utilizadas na Equação 6.17, o usuário **deve** impor o correspondente grau de saturação desejado e recorrer à Equação 6.8.

O cálculo dos tempos de verde é realizado utilizando a Equação 6.12, exceto para o estágio cuja duração do tempo de verde real foi imposta como sendo igual ao tempo de verde de segurança.

6.15 Verde mínimo veicular

Verde mínimo veicular é um elemento da programação de uma sinalização semafórica, operando no tipo de controle atuado. Tem por objetivo garantir a passagem de um número

mínimo de veículos durante o período de verde de um estágio. Sua duração **deve** ser igual ou maior do que a do verde de segurança.

6.16 Extensão de verde

Extensão de verde é um elemento da programação do tipo de controle atuado. É o intervalo que se acresce ao tempo de verde veicular quando um veículo é detectado durante o verde mínimo veicular ou durante a extensão de verde anterior.

6.17 Tempo de verde máximo

Verde máximo é um elemento da programação do tipo de controle atuado. Tem por objetivo impedir que o tempo de verde se prolongue além de determinado valor, mesmo se ocorrerem ininterruptas solicitações de extensões de verde.

É utilizado para limitar o tempo de espera máximo dos pedestres ou dos veículos que pertençam a movimentos conflitantes com aquele que está sendo atendido pelo verde corrente.

O dimensionamento da duração do tempo de verde máximo depende das características do tráfego e da via. Sugere-se que esse valor seja 50% maior do que o tempo de verde que seria programado se o controle fosse feito por sinalização semafórica de tempo fixo.

6.18 Medidas de desempenho

É essencial avaliar continuamente o desempenho da operação do tráfego em decorrência da programação semafórica. Esta necessidade é maior quando uma nova programação é implementada, mas continua a ser necessária posteriormente, devido ao caráter dinâmico do trânsito.

Existem várias medidas de desempenho que podem ser empregadas nesta avaliação, dentre as quais as mais utilizadas são fila máxima, velocidade média, número de paradas, atraso, consumo de combustível, emissão de poluentes e custo monetário.

As medidas podem ser determinadas indiretamente por meio de programas de computador, denominados simuladores de trânsito. Algumas dessas medidas podem ser obtidas diretamente por meio de pesquisas em campo usando, por exemplo, os métodos indicados nos Apêndices 2 e 4.

A partir de algumas hipóteses simplificadoras, algumas das medidas de desempenho mais empregadas, como o atraso total e a fila máxima podem ser estimadas por expressões matemáticas (ver itens 6.18.2 e 6.18.3).

É importante ressaltar que é necessário avaliar o desempenho do trânsito tanto para os ocupantes dos veículos como para os pedestres.

6.18.1 Número de paradas

O número de paradas é um dos principais indicadores da qualidade da operação do trânsito podendo ser caracterizado pelo número total de paradas, número médio de paradas por veículo, ou porcentagem de veículos que param devido à sinalização semafórica.

A programação semafórica **deve** visar a minimização do número de paradas que, além de gerar desconforto ao usuário, aumenta o consumo de combustível e a emissão de determinados poluentes.

O número de paradas n_p, no caso de operação não saturada e fluxos de chegada e partida constantes (ver Figura 6.10) pode ser calculado pela Equação 6.18.

$$n_p = \frac{F \times FS}{FS - F} \times \frac{(t_c - t_{v,efet})}{3600} \qquad (6.18)$$

em que,

n_p – número de veículos, ou ucp, que sofrem parada por ciclo;

F – fluxo, em veículo por hora ou ucp por hora;

FS – fluxo de saturação, em veículo por hora ou ucp por hora.

6.18.2 Fila máxima

Define-se fila como o número total de veículos aguardando em uma aproximação para transpor um local semaforizado. Veículos aproximando-se devagar do final de uma fila usualmente também são considerados como integrantes da mesma.

O indicador “fila máxima” é um dos mais utilizados devido à facilidade com que pode ser observado diretamente em campo e ao fato de que reflete adequadamente os outros indicadores.

A obtenção em campo do indicador “fila máxima” é feita pela observação, ao longo de vários ciclos, do número máximo de veículos na fila por ciclo. O valor do indicador é calculado como a média das filas máximas observadas.

A Figura 6.10 representa uma situação hipotética em que tanto o fluxo de chegada dos veículos (segmento AD) como o de saída (segmento BC) são constantes, sem aleatoriedade e sem sobredemanda. A cota f_1 exemplifica a fila em um instante durante o período de vermelho enquanto f_2 corresponde a um instante durante o período de verde. A fila f_{max} representa a fila máxima, que ocorre no instante de abertura do verde.

Na Figura 6.10, “n_p” é o número de veículos que pararam no ciclo, o ponto C corresponde ao instante em que a fila é zerada, e “n_c” é o número total de veículos que chegaram no ciclo.

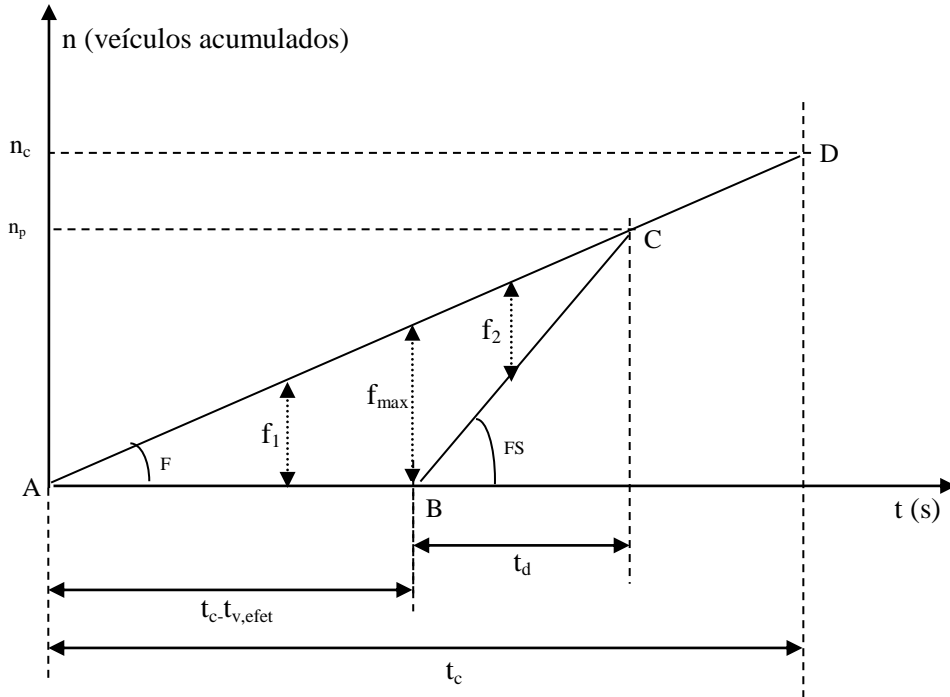



Figura 6.10: Processo de formação e dissipação de fila

A partir da Figura 6.10 pode-se deduzir as expressões da fila máxima e do tempo necessário para sua dissipação (Equações 6.19 e 6.20).

$$f_{max} = F \times \frac{(t_c - t_{v,efet})}{3600} \qquad (6.19)$$

e

$$t_d = \frac{F}{FS - F} \times (t_c - t_{v,efet}) \qquad (6.20)$$

em que,

f_{max} – fila máxima, em veículo ou ucp;

t_d – tempo necessário para dissipação da fila, em segundos;

F – fluxo, em veículo por hora ou ucp por hora;

FS – fluxo de saturação, em veículo por hora ou ucp por hora.

Situações onde o tempo necessário para dissipação da fila é superior ao tempo de verde resultam em congestionamento, com o crescimento da fila residual ciclo a ciclo, como pode ser observado na Figura 6.11.

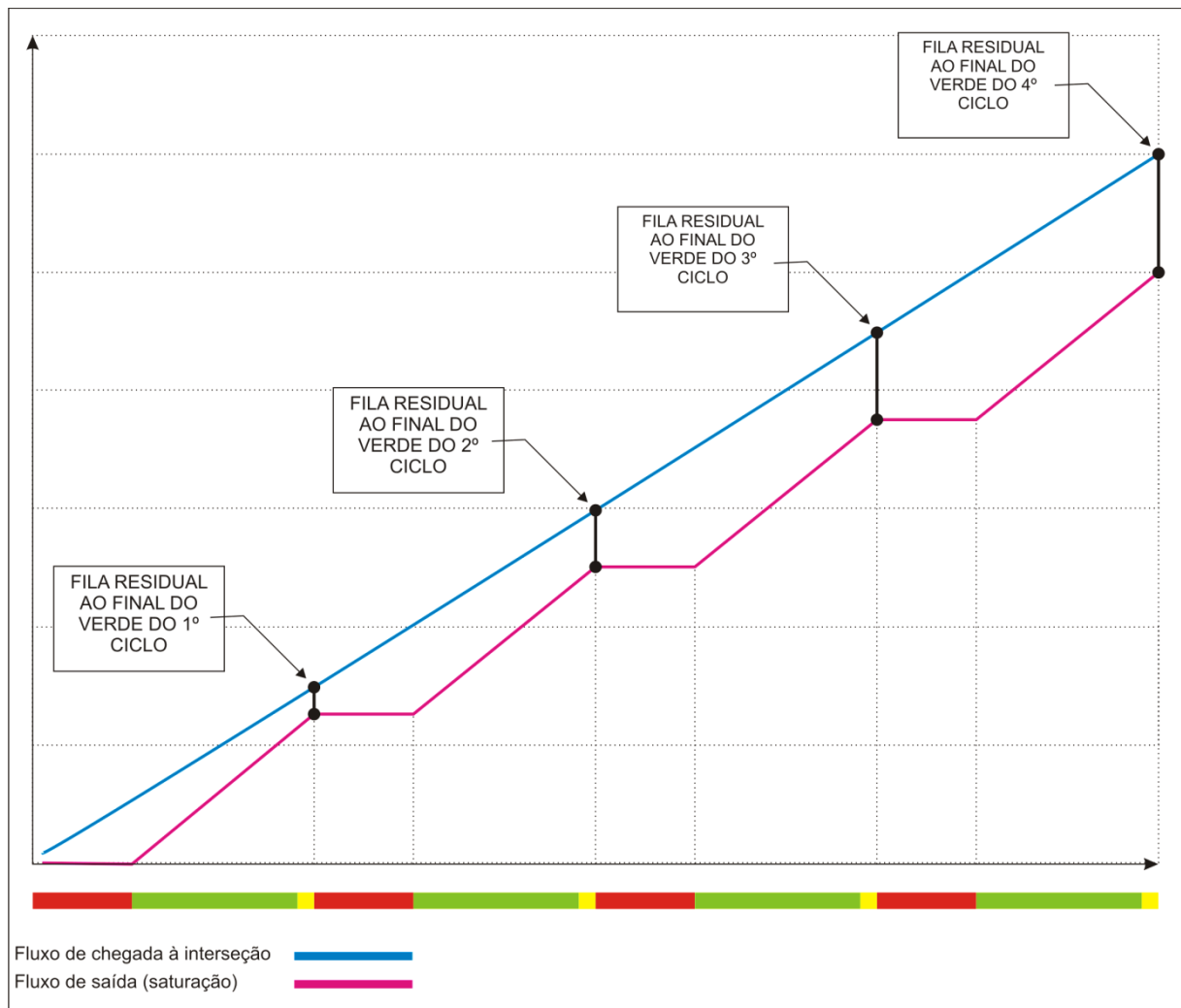



Figura 6.11: Ilustração do crescimento da fila ao longo de mais de um ciclo

6.18.3 Atraso

O indicador "atraso" visa medir a espera causada aos veículos pela sinalização semafórica.

O atraso representa a diferença entre o tempo gasto por um veículo para percorrer um determinado trecho sob o controle semafórico e o tempo que gastaria se percorresse o mesmo trecho em regime de fluxo ininterrupto, na velocidade desejada.

Nas situações de trânsito livre, em que todos os veículos conseguem passar no primeiro período de verde, o atraso é composto pelas parcelas atraso uniforme e atraso aleatório. À medida que o trânsito vai ficando mais saturado, surge também uma terceira parcela que é o atraso por sobredemanda. Quando a operação atinge o congestionamento total, o atraso aleatório desaparece, permanecendo os outros dois.

Na Figura 6.10, a área do triângulo ABC corresponde ao somatório dos atrasos dos veículos durante um ciclo. Como nesse exemplo hipotético o fluxo de chegada dos veículos é constante, sem aleatoriedade e sobredemanda, este valor é formado somente pelo atraso uniforme.

O valor da área do triângulo, dividido pelo número de veículos durante um ciclo (n_c na Figura 6.10), equivale ao atraso uniforme médio de um veículo e pode ser determinado pela Equação 6.21.

$$a_u = \frac{t_c(1-p)^2}{2(1-px)} \qquad (6.21)$$

em que

a_u – atraso uniforme médio de um veículo, em segundos;

t_c –tempo de ciclo, em segundos;

p – fração de verde (relação entre o tempo de verde efetivo e o tempo de ciclo);

x – grau de saturação.

A expressão da Equação 6.22, elaborada por Webster, pode ser usada para calcular o atraso médio de um veículo, em situações não congestionadas, desde que a chegada dos veículos obedeça a uma distribuição aleatória em torno de um mesmo valor médio, o que significa que a chegada **não deve** ser influenciada por sinalizações semafóricas a montante ou quaisquer outras condições que causem a alteração do valor médio de chegada ao longo do tempo.

Nessa equação, a primeira parcela corresponde ao atraso uniforme, a segunda ao atraso aleatório e a terceira consiste num termo de ajuste da formulação teórica aos resultados práticos registrados.

$$a_{u+al} = \frac{t_c(1-p)^2}{2(1-px)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0{,}65\left(\frac{t_c}{q^2}\right)^{1/3} x^{(2+5p)} \qquad (6.22)$$

em que,

a_{u+al} – atraso médio de um veículo, composto pelas parcelas atraso uniforme e atraso aleatório, em segundos;

t_c –tempo de ciclo, em segundos;

p – fração de verde (relação entre o tempo de verde efetivo e o tempo de ciclo);

q – fluxo expresso em veículo por segundo ou ucp por segundo;

x – grau de saturação

Na maioria dos casos práticos, não se pode considerar que a chegada dos veículos obedeça a um padrão de aleatoriedade em torno de um mesmo valor médio. Interferências a montante, tais como interseções semaforizadas ou não, tornam o padrão de chegada por demais complexo para ser modelado analiticamente com a devida precisão. Além disso, situações sujeitas à sobredemanda, como aquela exemplificada na Figura 6.11, apresentam, evidentemente, dificuldade adicional de modelagem.

Existem algumas expressões analíticas propostas, como por exemplo, as apresentadas no *HCM – Highway Capacity Manual* (TRB, 2000), que procuram tratar os casos práticos. Entretanto, existem vários programas de computador (simuladores da operação do tráfego)

que são capazes de oferecer respostas muito mais acuradas do que aquelas obtidas pelas expressões analíticas devido à possibilidade que têm de retratarem mais fielmente as particularidades de cada situação.